

временные масштабы волновых и колебат. процессов в ней намного меньше столкновительных. Релаксация по энергиям и импульсам протекает не за счёт столкновений, а через возбуждение коллективных степеней свободы плазмы — колебаний и волн. В плазме подобного типа, как правило, отсутствует термодинамич. равновесие, в частности между электронной и ионной компонентами. Быстропротекающие процессы в них, напр. ударные волны, также определяются возбуждением мелкомасштабных колебаний и волн. Характерным примером является бесстолкновительная ударная волна, образующаяся при обтекании солнечным ветром магнитосферы Земли.

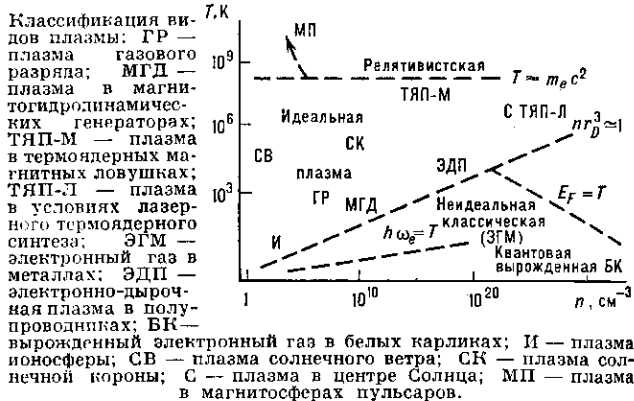
**Звёздная К. п.** Солнце и звёзды можно рассматривать как гигантские сгустки К. п. с плотностью, постоянно возрастающей от внеш. частей к центру: корона, хромосфера, фотосфера, конвективная зона, ядро. В т. н. нормальных звёздах высокие температуры обеспечивают термич. ионизацию вещества и переход его в состояние плазмы. Высокое давление плазмы поддерживает гидростатич. равновесие. Макс. расчётная плотность К. п. в центре нормальных звёзд  $\rho \sim 10^{24}$  см<sup>-3</sup>, темп-ра до  $10^8$  К. Несмотря на высокие плотности, плазма здесь обычно идеальная за счёт высоких темп-р: только в звёздах с малыми массами ( $\geq 0,5$  массы Солнца) появляются эффекты, связанные с неидеальностью плазмы. В центр. областях нормальных звёзд длины свободного пробега частиц малы, поэтому плазма в них столкновительная, равновесная; в верх. слоях, в особенности хромосфере и короне, плазма бесстолкновительная. (Эти расчётные модели основаны на ур-ниях *магнитной гидродинамики*.)

В массивных и компактных звёздах плотность К. п. может быть на неск. порядков выше, чем в центре нормальных звёзд. Так, в *белых карликах* плотность настолько велика, что электроны оказываются вырожденными (см. *Вырожденный газ*). Ионизация вещества обеспечивается за счёт большой величины кинетич. энергии частиц, определяемой *ферми-энергией*; это же является причиной идеальности К. п. в белых карликах. Статич. равновесие обеспечивается фермиевским давлением электронов вырожденной плазмы. Ещё большие плотности вещества, возникающие в нейтронных звёздах, приводят к вырождению не только электронов, но и нуклонов. К нейтронным звёздам относятся пульсары — компактные звёзды, имеющие диаметры  $\sim 20$  км при массе  $\sim 1 M_{\odot}$ . Пульсары характеризуются быстрым вращением (играющим важную роль в механ. равновесии звезды) и магн. полем дипольного типа ( $\sim 10^{12}$  Гс на поверхности), причём магн. ось не обязательно совпадает с осью вращения. Пульсары обладают магнитосферой, заполненной релятивистской плазмой, к-рая является источником излучения эл.-магн. волн.

Диапазон темп-р и плотностей К. п. огромен. На рис. схематически показано разнообразие видов плазмы и их примерное расположение на диаграмме температура—плотность. Как видно из диаграммы, последовательность в уменьшении плотности К. п. приблизительно такова: плазма звёзд, околопланетная плазма, плазма квазаров и галактич. ядер, межпланетная плазма, межзвёздная и межгалактич. плазма. За исключением плазмы ядер звёзд и ниж. слоёв околопланетной плазмы, К. п. является бесстолкновительной. Поэтому она часто бывает термодинамически неравновесной, а ф-ции распределения составляющих её заряд. частиц по скоростям и энергиям далеки от максвелловских. В частности, они могут содержать пики, соответствующие отд. пучкам заряд. частиц, быть анизотропными, в особенности в магн. космич. полях, и т. п. Такая плазма «избавляется» от неравновесности не через столкновения, а наиб. быстрым путём — через возбуждение эл.-магн. колебаний и волн (см. *Бесстолкновительные ударные волны*). Это при-

водит к тому, что мощность излучения космич. объектов, содержащих бесстолкновительную плазму, намного превосходит мощность равновесного излучения, а спектр заметно отличается от планковского. Примером является излучение *квазаров*, к-рое и в радио- и в оптич. диапазоне имеет неравновесный характер. И, несмотря на неоднозначность теоретич. интерпретации наблюдаемого излучения, все теории указывают на важность роли потоков релятивистских электронов, распространяющихся на фоне основной плазмы.

Др. источник неравновесного радиоизлучения — *радиогалактики*, к-рые по размерам значительно пре-



восходят галактики, видимые в оптич. диапазоне. Здесь также важную роль играют релятивистские электроны, выбрасываемые из галактик и распространяющиеся на фоне окружающей галактики плазмы. Неравновесность магнитосферной плазмы, проявляющаяся также в наличии пучков заряд. частиц, приводит к километровому радиоизлучению Земли.

Неравновесные плазменные явления приводят также к тому, что плазма не только мощно излучает, но и становится турбулентной за счёт того, что определ. типы возбуждаемых волн и колебаний либо «задерживаются» в плазме долго либо вообще не могут «покинуть» плазму (напр., ленгмюровские колебания). Это позволяет найти путь для решения проблемы т. н. «обойдённых» элементов в теории происхождения элементов во Вселенной. Наиб. распространённая теория происхождения элементов предполагает, что из исходных протонов и нейтронов элементы образуются путём последоват. захвата нейтронов, а когда новый изотоп перегружен нейтронами, то в результате его радиоактивного распада с испусканием электрона и антинейтрино возникает новый элемент. Однако есть «обойдённые» элементы (напр., дейтерий, литий, бор и т. д.), образование к-рых нельзя объяснить захватом нейтронов; их происхождение, возможно, связано с ускорением заряд. частиц в областях с высокой степенью плазменной турбулентности и последующими ядерными реакциями ускоренных частиц.

К. п. удалённых объектов исследуется дистанционными спектральными методами с помощью оптич. телескопов, радиотелескопов, внеатмосферных спутниковых телескопов в рентгеновском и  $\gamma$ -диапазонах излучения. С помощью приборов, установленных на ракетах, спутниках и космич. аппаратах, быстро расширяется диапазон прямых измерений параметров К. п. в пределах Солнечной системы. Эти методы включают в себя использование зондовых, волновых низко- и высокочастотных спектрометрич. измерений, измерений магн. и электрич. полей (см. *Диагностика плазмы*). Так были обнаружены радиац. пояс Земли, солнечный ветер, бесстолкновительная ударная волна впереди магнитосферы Земли, хвост магнитосферы,